

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.007

基于河道径流可变区间的河流水资源可开发利用率分析

张 锦,徐琳瑜

(北京师范大学水环境模拟国家重点实验室,北京 100875)

摘要:为了确定水电开发活动对河流水资源的可开发利用率,建立分期展布的河道径流可变区间核算方法,其中河道径流包括河道最小生态需水和河道最大洪流,并以西藏拉萨河为例进行核算。结果表明:拉萨河河道最小生态需水和最大洪流年内动态变化分别为 29.5 ~ 328.3 m³/s 和 95.1 ~ 1 673.4 m³/s。与河道最小生态需水约束相比,河道径流可变区间约束使得拉萨河年调节型水电开发的水资源可开发利用率从 60.2% 下降到 18.7%。指出对于径流丰枯特征十分明显的季节性河流,大型水利工程在平衡径流季节分布的过程中,应该受河道径流可变区间约束,尤其是枯水期最大洪流约束下河道径流量的可增加空间。

关键词:最小生态需水;最大洪流;河道径流可变区间;水资源开发利用率;拉萨河

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)04-0037-05

Analysis of exploitable rate of river water resource based on variable interval of river runoff

ZHANG Jin, XU Linyu

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to determine the exploitable rate of river water resource by hydropower projects, we established a variable interval calculation method for river runoff of period distribution to calculate the river minimum ecological water demand and the maximum river torrent. Taking Lhasa River in Tibet, China as an example, the minimum ecological water demand and the maximum river torrent were calculated. The results show that the minimum ecological water demand and the maximum river torrent of Lhasa River are 29.5 ~ 328.3 m³/s and 95.1 ~ 1 673.4 m³/s, respectively. Compared with the constraints of minimum ecological water demand, the constraints of variable interval of river runoff decrease the water resources exploitable rate by the regulation development of water and electricity in Lhasa River from 60.2% to 18.7%. The author of this paper thinks that as for the seasonal rivers which have a significant characteristics of seasonal abundance and dry runoff, large-scale water projects should be constrained by the river variable interval during its balance to the runoff seasonal distribution, especially by the increasable interval of river runoff under the maximum torrent constraint in the dry season.

Key words: minimum ecological water demand; maximum torrent; variable interval of river runoff; exploitable rate of river water resource; Lhasa River

长期以来,人们对河流水资源的开发利用以满足农业、工业和生活用水为出发点,对河流生态系统本身必须留存和消耗的水资源重视不够。尤其在在我国黄淮海流域,半干旱气候条件使得流域水资源并不充沛,随着城市化和经济发展,工农业用水与生态需水的矛盾加剧,不合理的用水配置使得流域面临着枯水季断流、湿地萎缩、河道泥沙淤积等一系列水生态问题,河流水资源的可再生性受到威胁^[1]。出

基金项目:环保部公益性行业科研专项(201209032);国家科技支撑计划(2012BAC05B02)
作者简介:张锦(1986—),博士研究生,研究方向为水资源开发规划。E-mail: zhangjin_315@163.com
通信作者:徐琳瑜,教授。E-mail: xly@bnu.edu.cn

现水生态问题后,被动地研究河流的水资源可开发利用问题,效果并不理想,而主动地研究水资源充足且水资源需求潜力大的西南部河流的水资源可开发利用,有助于避免未来水资源开发过程中出现严重的水生态问题。

面对日益严重的河流水生态问题和日益突出的用水矛盾,河道生态需水研究开始引人关注。河道生态需水通常是指为了维持河流生态系统的基本生态功能,河道内应保持的流动水量^[2]。河流生态系统的基本生态功能主要包括:保护和改善河流水体水质,维持岸栖和水栖生物生境,维持河流水量平衡、水沙平衡、水盐平衡和水热平衡,以及维持河口地区生态环境平衡等^[3]。在维持河流生态系统基本生态功能下,通常得到河道最小生态需水。然而,河流水生生物经过长期的适应,对不同时期的河道天然径流产生了特定的耐受空间,这就要求不同时期的河道存在径流可变区间,仅以河道最小生态需水作为阈值来开发利用河流水资源并不足以充分保护河流生态环境。

因此,笔者选择西藏拉萨河为例,基于水电开发是拉萨河目前水资源开发的主要方式,针对拉萨河流域潜在的水资源开发需求,估算拉萨河不同时期的河道径流可变区间,为规划当地未来合理的水资源开发规模提供参考。

1 研究方法

1.1 研究原理

我国西部地区河流径流存在明显的季节分化特征,存在枯水期、汛前期、汛期和汛后期。其中汛前期和汛后期的平均径流量相似,本文采用三分法并基于聚类分析,将拉萨河径流分为枯水期径流,平水期(汛前和汛后)径流和汛期径流。聚类即“物以类聚”,其原理是在一堆变量中,先合并相关性较高的类,之后再根据合并类与其他类之间的亲疏程度,再进行第二次合并,依此类推,最后使得同一类别内的数据差异尽可能小,而不同类别间的数据差异尽可能大。

河流天然最小月均径流和最大月均径流是能够满足河流基本生态环境功能的径流区间,在这个区间内,水生生物经过长期的适应,能够保持正常的群落结构,河流生态系统也不会遭受不可恢复的破坏。有学者结合年内各月最小月均径流量的年均值(简称为最小年均径流量)与多年年均径流量,两者之比得到同期均值比,并通过该同期均值比与各月多年月均径流量的乘积来展布计算河道每月的最小生态需水^[4]。同理,本文结合年内各月最大月均径流

量的年均值(简称为最大年均径流量)与多年年均径流量,两者之比得到同期均值比,并基于此来展布计算河道最大洪流,继而获得不同时期的河道径流可变区间。

大型水电开发工程为平衡河流水资源的季节分配不均问题,在汛期蓄水(图1),会减少下游河道径流,形成减水河段B1和D1,大水电蓄水和水电引水共同形成减水河段C1。同时,大型水电工程在枯水期放水(图2),会增加下游河道径流,形成增水河段B2和D2,大水电放水和水电引水形成增水减弱河段C2。因此。水电站的蓄水放水过程对下游河道水文情势的改变幅度可能超过河道的径流可变区间。也就是说,河道径流可变区间限制了大型水电工程的蓄水放水总量,继而限制了大型水电工程对河流水资源的可开发利用。

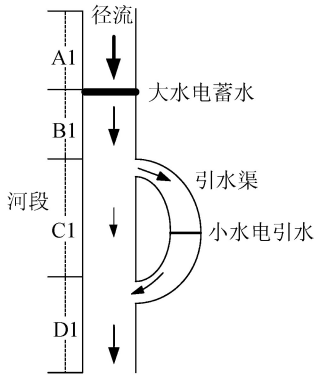


图1 大型水电工程在汛期蓄水降低下游河道径流

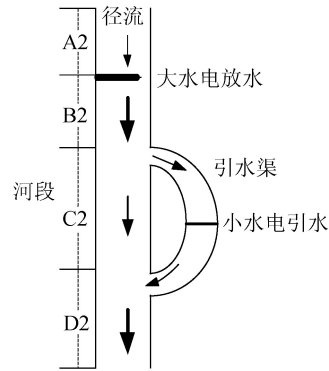


图2 大型水电工程在枯水期放水后增加下游河道径流

1.2 计算方法

径流分期以各月多年月平均径流为基础数据,根据各月多年月平均径流大小,基于 SPSS16.0 实现聚类分析,获得 3 个分期,即平水期、汛期和枯水期。

基于上述的径流分期原理和河道径流可变区间原理,不同时期的河道径流可变区间的计算方法如下:

$$\bar{Q} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{q}_i \quad (1)$$

其中
$$\bar{q}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{ij}$$

其中
$$\bar{Q}_{\min} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_{\min(i)} \tag{2}$$

其中
$$q_{\min(i)} = \min(q_{ij})$$

$$\bar{Q}_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_{\max(i)} \tag{3}$$

其中
$$q_{\max(i)} = \max(q_{ij})$$

$$Q_i = [\eta_1, \eta_2] \bar{q}_i \tag{4}$$

其中

$\eta_1 = \bar{Q}_{\min} \sqrt{Q}$ $\eta_2 = \bar{Q}_{\max} \sqrt{Q}$

式中: $\bar{Q}$ 为某时期内河道多年平均径流量, m^3/s ; $\bar{q}_i$ 为第 i 个月的多年月均径流量, m^3/s ; $q_{\min(i)}$ 和 $q_{\max(i)}$ 分别为第 i 个月的多年最小和最大月均径流量, m^3/s ; q_{ij} 为第 j 年第 i 个月的月均径流量, m^3/s ; $\bar{Q}_{\min}$ 和 $\bar{Q}_{\max}$ 分别为某时期内河道多年最小和最大年均径流, m^3/s ; η_1 和 η_2 分别为同期均值比(小)和同期均值比(大) Q_i 为第 i 个月的河道生态需水的阈值空间, m^3/s ; n 为统计年数; m 为某时期持续的月数。

大型水电工程对河流水资源的可开发利用率, 根据满足河道径流可变区间后剩余可利用水资源占其径流总量的比例来确定。

1.3 数据来源

拉萨河历史径流数据来源于拉萨水文站 1956—1998 年共 43 a 的逐月月平均径流记录。拉萨水文站位于拉萨河下游, 目前和近期的拉萨河流域的水资源开发活动都规划在拉萨河中上游。开展下游河道生态需水阈值核算能有效地约束中上游地区水资源开发活动规模。

2 研究结果

2.1 拉萨河径流分期特征

基于拉萨河下游拉萨水文站多年历史径流数据, 得到年内各月份的多年月均径流量及其聚类结

果(表 1)。拉萨河枯水期为 11 月至次年 5 月, 持续 7 个月; 平水期为 6 月和 10 月(其中 6 月为汛前期, 10 月为汛后期), 持续 2 个月; 汛期为 7—9 月, 持续 3 个月。汛期、平水期和枯水期的径流总量分别占到年径流总量的 62. 1% , 19. 8% 和 18. 1% 。

2.2 拉萨河河道径流可变区间

拉萨河在枯水期、平水期和汛期的河道径流可变区间分别处于同期平均径流量的 59. 0% ~ 190. 1% , 45. 2% ~ 211. 5% 和 38. 2% ~ 194. 7% 。河道最小生态需水的年内动态变化较大, 处于同期平均径流量的 38. 2% ~ 59. 0% , 枯水期最小生态需水占其平均径流的比例最大, 而丰水期最小生态需水占其平均径流的比例最小。河道最大洪流的年内动态变化较小, 处于 190. 1% ~ 211. 5% (表 1)。

满足河道最小生态需水后, 河道剩余的径流为可利用水资源, 即可供大型水电站蓄存或小型水电站引水。拉萨河河道最小生态需水和河道可利用水资源的年内动态变化分别为 29. 5 ~ 328. 3 m^3/s 和 20. 5 ~ 531. 6 m^3/s 。其中 2 月份的河道最小生态需水和可用于水资源最小, 8 月份的河道最小生态需水和可利用水资源最大(图 3)。

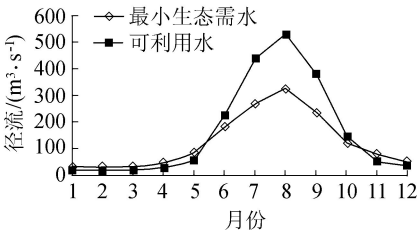


图3 拉萨河河道最小生态需水与剩余可利用水资源的年内展布

2.3 拉萨河水资源可开发利用率

以拉萨河流域的年调节型水电开发(旁多为年调节型水电站)为例, 水电站在 6—10 月(平水期和汛期)完成蓄水过程, 在 11 月至次年 5 月(枯水期)完成放水过程。从常规的最小生态需水约束角度来

表 1 拉萨河径流分期与河道径流可变区间

月份	$\bar{Q}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	分期聚类结果	$Q_{\min}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_{\max}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	η_1	η_2	径流可变区间/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	56. 5	枯水期	37. 0	75. 7	59. 0	190. 1	33. 3 ~ 107. 4
2	50. 0		33. 9	68. 6			29. 5 ~ 95. 1
3	57. 6		45. 3	78. 0			34. 0 ~ 109. 5
4	70. 0		45. 2	184. 0			41. 3 ~ 133. 1
5	141. 4		67. 3	404. 0			83. 4 ~ 268. 8
6	403. 4	平水期	169. 0	980. 0	45. 2	211. 5	182. 3 ~ 853. 2
7	706. 0	汛期	308. 0	1 250. 0	38. 2	194. 7	269. 7 ~ 1374. 6
8	859. 5		283. 0	1 800. 0			328. 3 ~ 1673. 4
9	612. 4		240. 0	1 190. 0			233. 9 ~ 1192. 3
10	267. 5	平水期	134. 0	439. 0	45. 2	211. 5	120. 9 ~ 565. 8
11	126. 3	枯水期	78. 4	191. 0	59. 0	190. 1	74. 5 ~ 240. 1
12	85. 6		39. 5	120. 0			50. 5 ~ 162. 7

看,在平水期和汛期,满足河道最小生态需水后的剩余可利用水资源总量是其最大的可蓄水量,该蓄水量约为平水期和汛期径流总量的 60.2%,即此时满足平水期和汛期最小生态需水后,该时期内河道水资源可开发利用率达 60.2%。然而,若这部分蓄存的水资源在枯水期匀速释放到下游河道后,拉萨河下游河道的模拟水文情势和各月份的最大洪流如图 4。在整个枯水期,河道的模拟径流都超过了自然条件下河道的最大洪流,可能会破坏枯水期的河流生态系统的正常结构与功能。

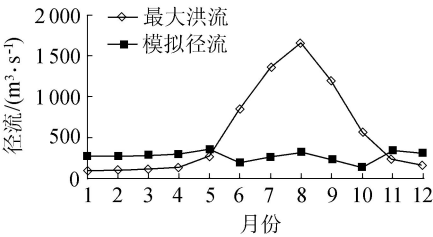


图4 年调节型水电站充分运行后的拉萨河模拟径流

也就是说,对于丰枯差异十分明显的季节性河流,仅从河道最小生态需水为约束条件来规划水资源开发活动是不够的。应该考虑河道径流可变区间,同时包括河道的最小生态需水和最大洪流。同样以拉萨河的年调节型水电开发为例,满足最大洪流约束下,枯水期(11月至次年5月)河道径流的增加空间为 45.4 ~ 128.5 m³/s,总量约为 13.8 亿 m³,该量即为年调节型水电站在平水期和汛期的最大可蓄水量。因此,在满足枯水期河道最大洪流约束下,以年调节型水电开发方式的可开发利用水资源约为平水期和汛期径流总量的 18.7%,仅占该时期满足最小生态需水后河道可利用水资源的 31.1%。满足枯水期河道最大洪流下的水资源可开发利用率要小于满足汛期和平水期最小生态需水下的水资源可开发利用率,两者相比,应该以前者作为规划未来水资源开发活动的参考标准。

3 讨 论

拉萨河径流具有非常明显的丰枯特征,加之当地引水工程建设缓慢,使拉萨河流域长期以来都存在较为明显的工程性缺水问题。汛期大量可利用的水资源得不到有效利用,而枯水期紧缺的可利用水资源无法满足下游农牧区在冬春早期的农灌用水,限制了下游农牧业的发展。

近年来在拉萨河上游陆续修建直孔(始建于2003年)和旁多(始建于2008年)等大型水利工程后,水利工程的水资源季节调节作用大幅度改变了拉萨河下游河道的水文情势。汛期下游河道最大径

流呈降低趋势,而枯水期下游河道最小径流呈增加趋势(图5)。

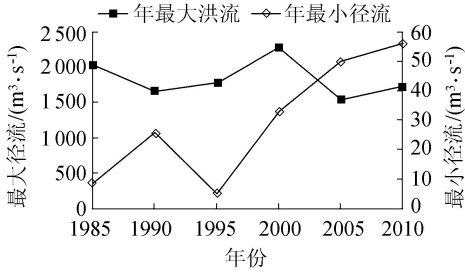


图5 拉萨河下游河道水文情势变化

枯水期河道流量的增加有利于下游冬春早期的农灌引水,但是在距离水利工程放水口和农灌区引水口之间的河段会出现河道径流量的骤增,以可能使该河段的径流超过其最大洪流,继而破坏河流生态系统。然而,目前水利工程的发展规划与建成运营通常都只考虑满足河道的最小生态需水^[5-7],却忽略了水利工程的季节性放水可能会超过下游河道的最大洪流。

河道生态需水的计算方法包括水文学法、水力学法、水文-生物分析法、生境模拟法、综合分析和环境功能设定法等^[8]。与其他河道生态需水核算方法相比,基于河流历史径流量的水文学法较为简单且所需数据易获取,较为适合对精度要求较低的河流前期规划阶段的生态需水核算。基于水文学法来计算生态需水在我国也得到了广泛的应用^[9-11]。在长期的应用过程中,常规的水文学法是试图估算出最小生态需水。然而生物生存对生态环境条件有特定的耐受范围,未来研究需要在最小生态需水下限基础上,发展与之相对的上限,组成径流可变区间。因此本文从水文学方法出发,构建分期展布的河道径流可变区间估算方法,试图发展水文学方法在河道径流的动态性和阈值性方面的应用,并基于径流可变区间核算成果来引导流域的水资源开发活动。

4 结 论

本文建立的分期展布的河道径流可变区间估算方法,包括河道最小生态需水和最大洪流,发展了水文学法在核算河道径流方面的动态性和阈值性。

与汛期和平水期河道最小生态需水约束相比,枯水期河道最大洪流约束使得上游以年调节型水电开发方式的水资源可开发利用率从 60.2% 下降到 18.7%。对于丰枯特征十分明显的季节性河流,其水利工程开发与运行不仅要考虑满足河道的最小生态需水,尤其是大型水电站作为调节和平衡径流季节分布的水利工程,其规划与运行更要考虑到不超过枯水期河道的最大洪流。西藏地区地处季风气候

区,河道径流的季节分化十分明显,而且西藏地区的工程性缺水问题又亟须水利工程建设。因此,西藏地区河流的水资源开发工作应该重视目标河流的河道径流可变区间,并结合水利工程的运行特征,来确定合理的河流水资源可开发利用率。

参考文献:

[1] 杨志峰,崔保山,黄国和,等. 黄淮海地区湿地水生态过程、水环境效应及生态安全调控[J]. 地球科学进展, 2006, 21 (11): 1119-1126. (YANG Zhifeng, CUI Baoshan, HUANG Guohe, et al. Hydro-ecological processes, water-environmental effects and integrated control of ecological security for wetlands in huang-huai-hai region of China[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(11):1119-1126. (in Chinese))

[2] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17 (3): 430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advance in Water Science, 2006, 17 (3):430-434. (in Chinese))

[3] 魏彦昌,苗鸿,欧阳志云,等. 海河流域生态需水核算[J]. 生态学报, 2004, 24 (10): 2100-2107. (WEI Yanchang, MIAO Hong, OUYANG Zhiyun, et al. Primary estimate of ecological water requirement in Haihe Basin [J]. Acta Ecological Sinica, 2004, 24 (10): 2100-2107. (in Chinese))

[4] 潘扎荣,阮晓红,徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报, 2013, 44 (1): 119-126. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (1): 119-126. (in Chinese))

[5] FANG Y, DENG W. The critical scale and section

management of cascade hydropower exploitation in Southwestern China[J]. Energy, 2011(36):5944-5953.

[6] FANG Y, WANG M, DENG W, et al. Exploitation scale of hydropower based on instream flow requirements: A case from southwest China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010(14):2290-2297.

[7] BABEL M S, NGUYEN D C, MULLICK M R A, et al. Operation of a hydropower system considering environmental flow requirements: A case study in La Nga River Basin, Vietnam [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2012(6):63-73.

[8] 杨志峰,张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2003, 18 (3): 294-301. (YANG Zhifeng, ZHANG Yuan. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18 (3): 294-301. (in Chinese))

[9] 宋兰兰,陆桂华,刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. 水利学报, 2006, 37 (11): 1336-1341. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU ling. Estimation of instream flow based on hydrological indexes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11):1336-1341. (in Chinese))

[10] 倪晋仁,金玲,赵业安,等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. 水利学报, 2002, 33 (10): 1-7. (NI Jinren, JIN Ling, ZHAO Ye'an, et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (10):1-7. (in Chinese))

[11] 赵彦伟,徐琳瑜. 广州市水资源可持续利用研究[J]. 水资源保护, 2006, 22 (1): 26-29. (ZHAO Yanwei, XU Linyu. Sustainable utilization of water resources of Guangzhou City [J]. Water Resource Protection, 2006, 22 (1):26-29. (in Chinese))

(收稿日期:2014-08-30 编辑:徐 娟)

(上接第 14 页)

[57] BAUMANN T, FRUHSTORFER P, KLEIN T, et al. Colloid and heavy metal transport at landfill sites in direct contact with groundwater [J]. Water Research, 2006, 40 (14): 2776-2786.

[58] 尚嫚廷,冯杰,刘佩贵. 大孔隙对土壤水动力弥散系数影响的实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009 (5): 52-54, 66. (SHANG Manting FENG Jie, LIU Peigui. Effect of macroporous on soil hydrodynamic dispersion coefficient [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009(5):52-54, 66. (in Chinese))

[59] SÁNCHEZ-VILA X, CARRERA J, GIRARDI J P. Scale effects in transmissivity[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(1):1-22.

[60] 李国敏,陈崇希. 空隙介质水动力弥散尺度效应的分形特征及弥散度[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20 (4): 405-409. (LI Guomin, CHEN Chongxi. Fractal geometry and estimation of scale-dependent dispersivity in geologic media[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1995, 20 (4): 405-409. (in Chinese))

[61] 王永森,陈建生,陈亮. 考虑弥散系数尺度效应的溶质运移模型研究[J]. 人民黄河, 2008, 30 (11): 60-62. (WANG Yongsen, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Research on solute transport model with scale-dependent dispersion coefficients[J]. Yellow River, 2008, 30 (11): 60-62. (in Chinese))

(收稿日期:2014-12-16 编辑:高渭文)